DOI: 10.5846/stxb201604120668
赵秋叶,施晓清.城市产业生态网络特征与演进规律——以北京市为例.生态学报,2017,37(14):4873-4882.
Zhao Q Y,Shi X Q.Characteristics and evolution of an urban industrial ecological network:a case study of Beijing.Acta Ecologica Sinica,2017,37(14):4873-4882.

城市产业生态网络特征与演进规律
——以北京市为例

赵秋叶[1,2],施晓清[1,2,*]
1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:产业生态系统发展规律对于产业转型升级至关重要,对其进行研究也是当前产业生态学的新方向。产业生态系统是指在一定区域内,产业组分以及环境组分之间通过物质交换及能量流动等形成的有机统一整体。产业生态网络则是其各组分之间通过物质流等相互作用构成的生态关系的一种拓扑结构。基于货币型投入产出模型通过物质型转化构建城市尺度产业生态网络,借鉴生态网络分析方法,提出通过循环性、生态效率、上升性3类特征指标判定产业生态网络的演进规律。实证研究了2005—2014年北京市产业生态系统的特征及其演进规律,阐明了其发展的趋势。主要结论是:从趋势分析,北京市产业生态系统循环性、生态效率和上升性有随时间而提升的趋势。其中,循环性和上升性变化趋势一致:总体呈现上升趋势,且2007年数值明显高于其他年份;生态效率总体随年份呈现波浪式增速的趋势;从指数分析:各年份循环指数(FCI)介于0—1之间,表明产业系统的物质循环流量均小于直接流量;A/C指数介于0.187—0.256之间,表明离理论可持续发展状态(0.401)还有相当的距离;生态效率10年提高2.4倍,在2013年已经接近1,到2014年实现大于1的水平,其生态效率已达到这10a间的最优的状态。总体上,北京市产业系统正在向物质循环性、生态效率以及系统上升性逐步提高的方向转型。

关键词:城市产业生态系统;生态网络;循环性;生态效率;上升性和恢复力;演进

Characteristics and evolution of an urban industrial ecological network:a case study of Beijing

ZHAO Qiuye[1,2],SHI Xiaoqing[1,2,*]
1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Science, Beijing* 100085, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: The evolution of the industrial ecosystem is extremely important for industrial transformation and growth, and it is the frontier direction of industrial ecology. The industrial ecosystem is an analogue of a biological ecosystem and conducts material exchange and energy flow between different industries and the environment in a certain area. In such a system, the consumption of energy and materials is optimized, waste generation is minimized, and the effluents of one process serve as the raw material of another process. An industrial ecological network is a topological structural network consisting of the ecological relationships among different components, such as material or energetic relationships. In this paper, we construct a physical urban industrial ecological network based on an input-output analysis. Based on the ecological network analysis method, we suggest three characteristics indicators, roundput, eco-efficiency, and ascendency, to analyze the evolution of the urban industrial ecosystem. Roundput serves to describe the condition of an industrial ecosystem as it suits the purpose

基金项目:国家自然科学基金资助(71373259)
收稿日期:2016-04-12; **网络出版日期:**2017-03-02
*通讯作者 Corresponding author.E-mail: shixq@rcees.ac.cn

of being opposite to the term 'throughput', which is commonly used to illustrate the linear nature of the material flows in an industrial system; from raw materials, to products, to wastes. Ascendency, which combines system activity and organization, provides a single measure of the unitary process of growth and development. In addition, we use Beijing as an example to study the evolutionary tendency of the Beijing industrial ecosystem from 2005—2014. The following conclusions are drawn: (1) from tendency analysis, the three characteristics of the Beijing industrial ecosystem significantly increased over time. The evolution tendency of roundput and ascendency were nearly the same; the overall trend was upward with time and the numerical value in 2007 was significantly higher than that of other years. Eco-efficiency showed a trend of wave growth over the year. There were four periods of eco-efficiency growth based on the increasing speed. Period one was from year 2005 to 2007 (average increasing speed was 6.03% per year). Period two was from year 2007 to 2009 (average increasing speed was 17.42% per year). Period three was from 2009 to 2011 (average increasing speed was 3.58% per year) and period four was from 2011 to 2014 (average increasing speed is 16.76% per year). The eco-efficiency value in period one and three increased mildly, whereas in period two and four it increased sharply. (2) From indicator value analysis, the Finn cycling index of each year was between 0 and 1, which indicated that cycling throughflow of the Beijing industrial ecosystem was greater than straight throughflow. The eco-efficiency value increased 2.4 times in 10 years. Moreover, the eco-efficiency value in 2013 was slightly lower than 1, whereas in 2014 the eco-efficiency value was higher than 1, which indicated that the eco-efficiency in the Beijing industrial ecosystem reached the optimum state in 2014 from 2005 to 2014. The A/C value ranged from 0.187 to 0.256, lower than 0.401, indicating sustainable development capacity of the Beijing industrial ecosystem is not at the optimum state. Future research will focus on constructing compartmental industrial ecological networks and establishing industrial symbiosis networks between waste by-products of industrial sectors.

Key Words: urban industrial ecosystem; ecological network; roundput; eco-efficiency; ascendency and redundancy; evolution

传统产业资源利用率低、环境污染严重的发展模式是城市可持续发展的瓶颈,产业生态学家 Graedel 教授认为传统产业系统向产业生态系统的转型是实现可持续发展的根本途径,因此城市产业生态系统转型至关重要[1]。城市生态学家王如松先生提出生态产业是基于生态系统承载能力、具有高效经济过程以及和谐的生态功能的网络进化型产业[2]。产业生态系统是指在一定区域内,模仿自然生态系统产业组分以及环境组分之间通过物质交换、能量流动形成的有机统一整体[3]。而产业生态网络则是产业生态系统中各组分之间通过物质、能量及信息相互作用构成的生态关系的一种拓扑结构,其特征分析及演进规律的研究对于城市产业生态系统转型至关重要。

当前,国内外学者对产业生态系统转型的研究多集中在工业代谢分析、产业链分析、清洁生产及生态设计这几大类。Ayres 等人率先提出工业代谢的概念[4],基于这种思想 Frosch 提出了产业代谢理论,即通过自然生态系统循环再生过程研究产业代谢过程[3]。Chopra、陈彬等将产业生态系统看作自然生态系统研究其代谢过程[5-6]。产业链分析主要是指从调整产业链的结构与组成入手,通过产业链重组以及产业链的稳定性分析研究城市生态转型,日本的 Eco-town[7]、中国广西贵糖绿色产业供应链形成的产业共生体[8]是相关实践,还有如蔡小军[9],张萌[10]等从稳定性入手分析城市产业生态转型。孙明贵、蔡建和等从清洁生产和生态设计研究城市产业生态转型[11-12]。近年来国内外学者开始关注产业生态系统发展规律的研究,2010 年,黄嘉莉应用生态网络分析方法中的指标对北京市经济发展趋势进行了评价[13];2012 年 Bodini 利用 Ulnowicz 提出生态网络的指标分析了城市生态系统的发展及持续性等,并运用于水资源网络评价中[14];2014 年,张妍也应用基于投入产出表的生态网络分析方法对北京市产业生态网络的营养级结构以及组分之间的共生关系进行分析[15]。但是,针对产业生态系统各组分之间物质流特性及其对系统发展的影响研究还很缺乏。为此,本文提出针对产业生态网络特性及演进规律的研究。首先,基于投入产出货币型模型,通过物质型转换构建城市产业生态

网络。并借鉴生态网络分析指标,从系统物质流动的可持续性视角,提出借鉴循环性、生态效率以及上升性 3 类指标分析判定的演进规律分析思路,并实证研究了 2005—2014 年北京市产业生态网络特征及其发展的趋势。

1　产业生态网络特征及分析方法

1.1　产业生态网络特征

王如松先生 2006 年指出产业生态系统有整体性、循环性、层次性、开放性和动态性五大特征[16];国外学者 Korhonen 将产业生态系统与自然生态系统进行类比,提出产业生态系统也具有显著的 4 个特性:循环性(Roundput)、多样性、地域性和动态演进[17]。传统的生态网络分析方法是从整体上辨识系统内在属性的一种分析方法,突出整体性和系统性[18]。该方法通常利用结构特性、稳定性、上升性、随机性以及网络效能来分析生态网络的属性等。本文针对产业生态网络物质流动的特性及可持续发展目标,提出从产业生态网络的物质循环性、生态效率高效性及系统发展的上升性 3 个特征来分析产业生态网络的演进规律。产业生态网络的物质循环性是产业生态系统可持续发展的重要特征,它表征了产业生态系统物质持续利用的能力;生态效率是产业生态网络可持续发展的另一个基本特征,它表征了产业生态系统物质持续利用的能力;另外,上升性和恢复力从动态演化的角度揭示产业生态网络能否稳定、可持续发展,这两个特性的协调保障了产业生态系统的可持续发展能力[19]。

1.2　构建实物型城市产业生态网络

城市产业生态网络是由其中各产业部门通过物质流、能流、信息流等相互关联而构成的一个动态复杂网络。常见的货币型投入产出表是通过矩阵的方式描述城市各产业部门之间的产品和货币流动关系,由于本文所关注的是物质代谢对生态网络特征演进规律的影响,所以本文运用“隐含生态要素法”[15]将货币型投入产出表转化成实物型投入产出表。该实物型投入产出表表征了城市各部门之间的物质流动的网络关系。

货币型投入产出表转化为实物型投入产出表的主要步骤如下:

第一步　编撰货币-实物混合型投入产出表。表 1 中部门这部分为常规货币型投入产出表的部分(去掉最终使用),在中间流量部分下方加了一部分是最初资源投入,另一部分是废物排放(以物理单位衡量)。

表 1　货币-实物型混合投入产出表

Table 1　The basic form of the monetary-physical input-output table

投入和产出 Input and output		部门 Sector				总产出 Total output
	–	1	2	…	n	–
部门 Sector	1	X_{11}	X_{12}	…	X_{1n}	U_{11}
	2	X_{21}	X_{22}	…	X_{2n}	U_{22}
	…	…	…	…	…	…
	n	X_{n1}	X_{n2}	…	x_{nn}	U_{nn}
最初资源投入	1 *	P_{11}	P_{12}	…	P_{1n}	–
Initial resource inputs	2 *	P_{21}	P_{22}	…	P_{2n}	–
	…	…	…	…	…	–
	m *	P_{m1}	P_{m2}	…	p_{mn}	–
最终环境排放	m+1 *	$r_{(m+1)1}$	$r_{(m+1)2}$	…	$r_{(m+1)n}$	–
Waste emission	m+2 *	…	…	…	…	–
	…	…	…	…	…	–
	m+s *	$r_{(m+s)1}$	$r_{(m+s)2}$	…	$r_{(m+s)n}$	–

第二步　计算“隐含生态要素强度(embodied ecological element intensity)”系数。根据系统流入量和流出量平衡的原则,可以得到以下等式

$$P+\varepsilon H=\varepsilon U \tag{1}$$

$$\varepsilon = P(U-H)^{-1} \quad (2)$$

式中,ε 是"隐含生态要素强度"系数;P 是中间流量矩阵;H 是最初资源投入和最终废物排放矩阵;U 是总产出对角矩阵。

第三步 将货币型投入产出表转化成实物型投入产出表。计算 ε 矩阵的列和,然后将列和与货币型矩阵的相应列元素相乘得到实物型投入产出矩阵。

第四步 应用 UCINET 软件可视化城市产业生态网络。首先,编制关系矩阵。根据上文编制的物质型投入产出矩阵,矩阵中元素如果大于 0,那么关系矩阵的值为 1;如果矩阵中元素等于 0,那么关系矩阵的值为 0。其次,将编制好的关系矩阵导入 UCINET 中,即可生成产业生态网络。

1.3 产业生态网络分析指标及判定方法

1.3.1 循环性分析指标及判定方法

本文选取 Finn 循环指数(下文简称 FCI)量化系统中循环流量的强度,它被广泛应用于自然生态系统食物网循环性的计算过程,主要原因是 FCI 不受整个系统组分数量变化的影响,易于比较。计算方法如下[20]:

首先编制实物型投入产出矩阵(表 1,但是去掉其中总产出部分)

然后根据如下公式计算:

$$\mathrm{TST_C} = \left[\frac{(I-Q')^{-1}_{ii} - 1}{(I-Q')^{-1}_{ii}}\right] \times T_i \quad (3)$$

$$q_{ij} = F_{ij}/T_i \quad (4)$$

$$\mathrm{TST} = \mathrm{TST_S} + \mathrm{TST_C} \quad (5)$$

$$CI = \frac{\mathrm{TST_C}}{\mathrm{TST_S}} \quad (6)$$

式中,F_{ij}为 j 部门到 i 部门的流量,$i,j=1,\cdots,n$,T_i为通过 i 部门的总流量(i 部门的通流量),$\mathrm{TST}=\sum_{i=1}^{n} T_i$ 为整个系统通流量,$\mathrm{TST_C}$指循环通流量,$\mathrm{TST_S}$指直流通流量。

判定方法:$CI=0$,说明产业生态网络中没有物质循环;$0<CI<1$,说明产业生态网络中物质的循环流量小于直接流量,$CI>1$,说明产业生态网络中的物质循环流量大于直接流量。并且 CI 值越大,物质循环利用率越高,更加能够有效利用有限的资源。

1.3.2 生态效率分析指标及判定方法

世界可持续发展委员会(WBCSD)对生态效率的定义是:通过创造有价格竞争优势的产品和服务来满足人类的需求并提高生活质量,同时将环境影响和资源利用强度控制在地球的承载力水平之内[21]。从广义看来,生态效率可以看成"产出/投入"比[22]。"产出"指系统提供的产品和服务的价值,"投入"指系统消耗的资源和能源及其所造成的环境负荷[23]。

本文采用由 Andersenr 和 Petersen 提出的超效率 DEA 方法[24]计算产业生态系统生态效率。它能够在有效决策单元之间进行效率高低的比较,其模型主要是[25]:

$$\min\theta_0^{\mathrm{super}} \quad (7)$$

$$st \sum_{\substack{j=1\\j\neq 0}}^{n} \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \min\theta_0^{\mathrm{super}} x_{io}, i=1,2,3,\cdots,\mathrm{m} \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{j=1\\j\neq 0}}^{n} \lambda_j y_{ij} - s_i^+ = \mathrm{y}_{i0},\ i=1,2,3,\cdots,\mathrm{s} \quad (9)$$

$$\sum_{\substack{j=1\\j\neq 0}}^{n} \lambda_j = 1 \quad (10)$$

$$\lambda_j \geqslant 0, j\neq 0 \quad (11)$$

式中,θ_0^{super}是效率指数;λ_j是输入输出系数;x_{ij}为第 j 个评价单元的第 i 个输入指标值; S_i^- ,S_i^+ 分别为投入和产出松弛变量。

决策单元(DMU)选取原则:被评价的 *DMU* 的个数 n 以及输入输出个数之和($m+s$)必须满足 $n \geq 2(m+s)$,否则会影响到 *DEA* 效率的区分度和准确度[26]。

判定方法:如果效率指数 $\theta_0^{super}<1$ 说明投入和产出没有达到最优效率;如果 $\theta_0^{super}=1$ 表明投入和产出刚好达到最优效率;如果 $\theta_0^{super}>1$ 则说明投入和产出超过了最优效率。计算超效率 DEA 采用软件 EMS(Efficiency measurement system)1.3

1.3.3　上升性分析指标及判定方法

1986 年美国生态学家 Ulanowicz 以热力学、信息论、网络分析等为基础,提出了上升性理论,并指出系统经历演化的能力由两个方面组成:上升性和恢复力[19,27]。上升性使系统向有效率的方向发展,而恢复力使系统向无效率的方向发展,二者协同保障产业生态系统的稳定[18]。计算方法如下[19]:

上升性
$$A = \mathrm{TST} \cdot \mathrm{AMI} = \sum_{i,j} T_{ij}\log\left(\frac{T_{ij}T_{..}}{T_{.j}T_{i.}}\right) \tag{12}$$

发展能力
$$C = \mathrm{TST} \cdot H = -\sum_{i,j} T_{ij}\log\left(\frac{T_{ij}}{T_{..}}\right) \tag{13}$$

恢复力
$$R = \mathrm{TST} \cdot \Phi = -\sum_{i,j} T_{ij}\log\left(\frac{T_{ij}^2}{T_{.j}T_{i.}}\right) \tag{14}$$

判定方法:上升性(A)越大,网络向更加有效率的方向发展,恢复力(R)越大说明网络向无效率的方向发展。二者协调才能保障系统可持续发展,因此用上升性(A)与发展能力($C=A+R$)的比值来表示上升性和恢复力两者协同状态,即 A/C 值。Ulnowicz 根据可用数据推断当 A/C 值接近 0.401 的时候生态系统接近最佳的可持续发展水平[28],尽管 Ulnowicz 将该结论应用于自然生态系统,但是本文所构建的是物质流动网络,所以本文直接应用该结论,即当 A/C 值越趋近 0.401 时,产业生态系统越接近可持续发展状态。

2　北京市产业生态网络特征及演进研究

2.1　数据来源

考虑到原始数据的可获得性和准确性,本文构建 2005 年、2007 年、2010 年和 2012 年的北京市实物型产业生态网络。北京市货币型投入产出表来自北京统计信息网[29],各部门资源投入和环境排放数据来自《北京市统计年鉴》(2005—2015 年)[30]以及环保局调查所得数据。

2005 年、2007 年、2010 年和 2012 年的投入产出表均包含 42 各部门,2007 年和 2010 年的 42 个部门完全相同,然而 2005 年和 2012 年的 42 个部门与 2007 年有些许不同(表 2)。

表 2　各年份 42 部门之间差异

Table 2　Difference in sectors between different year

2005 年	2007 年	2010 年	2012 年
部门"通用、专用设备制造业"	部门"通用、专用设备制造业"	部门"通用、专用设备制造业"	拆分为"通用设备"和"专用设备"两个部门
不包括"废品废料"部门	"废品废料"	"废品废料"	"废品废料",增加"金属制品、机械和设备修理服务"部门
"交通运输及仓储业"和"邮政业"两个部门	"交通运输及仓储业"和"邮政业"两个部门	"交通运输及仓储业"和"邮政业"两个部门	合并为一个部门"交通运输、仓储和邮政"
"旅游业"	无"旅游业"这个部门	无"旅游业"这个部门	无"旅游业"这个部门
"科学研究事业"	"研究与试验发展业" "综合技术服务业"	"研究与试验发展业" "综合技术服务业"	"科学研究和技术服务"

2.2 北京市物质代谢网络模型

以 2007 年数据为例阐明如何利用货币型投入产出数据构建物质型产业生态网络。根据上文所提供的方法,首先编制出 2007 年北京市 42 部门货币-实物混合型投入产出表,然后通过矩阵变换计算可得出"隐含生态元素强度"矩阵,将强度矩阵列和与 2007 年北京市货币型矩阵的相应列元素相乘得到 2007 年北京市 42 部门实物型投入产出表。利用 UCINET 软件进行了构建网络图(图 1)。2005 年、2010 年、2012 年的实物型投入产出表都按照该方法进行编制和构建。

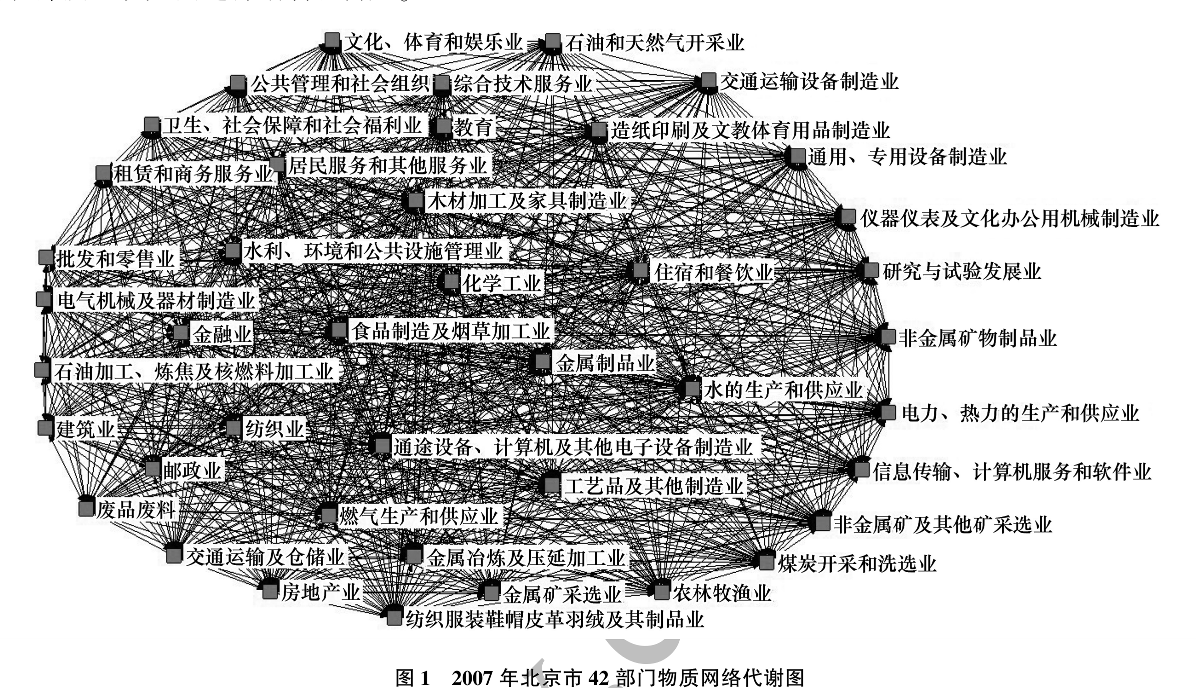


图 1 2007 年北京市 42 部门物质网络代谢图

Fig.1 Material metabolism figure between 42 industrial sectors of Beijing in year 2007

2.3 北京市产业生态网络特征及演进分析

2.3.1 循环性特征及演进规律

北京市 2005、2007、2010、2012 年产业生态网络 Finn 循环指数(FCI)分别为 0.3408、0.5020、0.3505、0.3950。这 4 个年份的循环指数值大于 0 小于 1,说明这 4 个年份的产业生态网络的物质循环流量小于直接流量。2005 年到 2012 年循环指数有逐年上升的趋势,说明北京市产业生态系统物质循环利用效率有增加趋势。2007 年循环指数显著高于其他 3 个年份,为 0.502,由于 2007 年循环流量显著高于其他年份,2007 年的循环流量是 2005 年的 2 倍,是 2010 年和 2012 年循环流量的 1.8 倍。

从循环流量部门分解图可以看出各个部门贡献多少循环流量,图 2(即循环流量部门分解图)是 2005 年、2007 年、2010 年和 2012 年各个部门的循环流量占该年份总循环流量的比值(比绝对值易于比较);又由于各部门循环流量又是由该部门总流量和该部门总流量循环比例所决定,图 3 表示四个年份北京市各部门总流量循环比例,平均值为 0.40。由于 2005、2007、2010、2012 年投入产出表部门分类略有不同,为方便比较,处理如下:将"通用设备"和"专用设备"合并为一个部门"通用、专用设备制造业";将"废品废料"和"金属制品、机械和设备修理服务"合并为一个部门"废品废料";将"交通运输、仓储业"和"邮政业"合并为一个部门"交通运输、仓储和邮政";将"研究与试验发展业"和"综合技术服务业"合并为一个部门"科学研究和技术服务"。

从循环流量来看(图 2),贡献最大的几个部门是农林牧渔业,通信设备、计算机及其它电子设备制造业,食品制造及烟草加工业,交通运输设备制造业,电力、热力的生产和供应业,化学工业,贡献率(4 个年份平均值)分别是 21.7%,12.8%,9.8%,7.5%,7.1%, 6.1%,其他部门的贡献率均小于 5%。从部门循环流量随年份变化趋势来看,煤炭开采和洗选业、化学工业、交通运输及仓储邮政业、住宿和餐饮业、金融业这 5 个部门随年份变化有循环流量增加的趋势,分别增加了 2.26 倍、2.44 倍、1.06 倍、1.64 倍、3.45 倍;1/2 部门随年份增加循

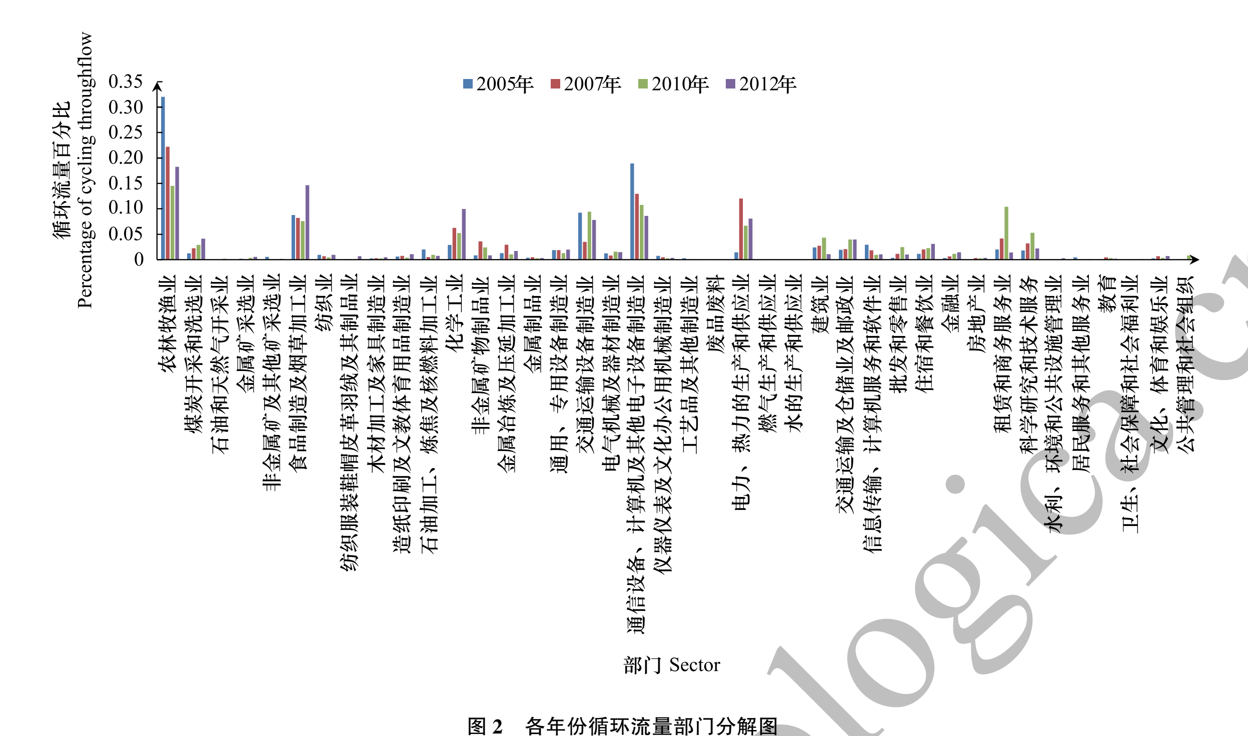


图 2　各年份循环流量部门分解图

Fig.2　Decomposition of cycling throughflow in different years

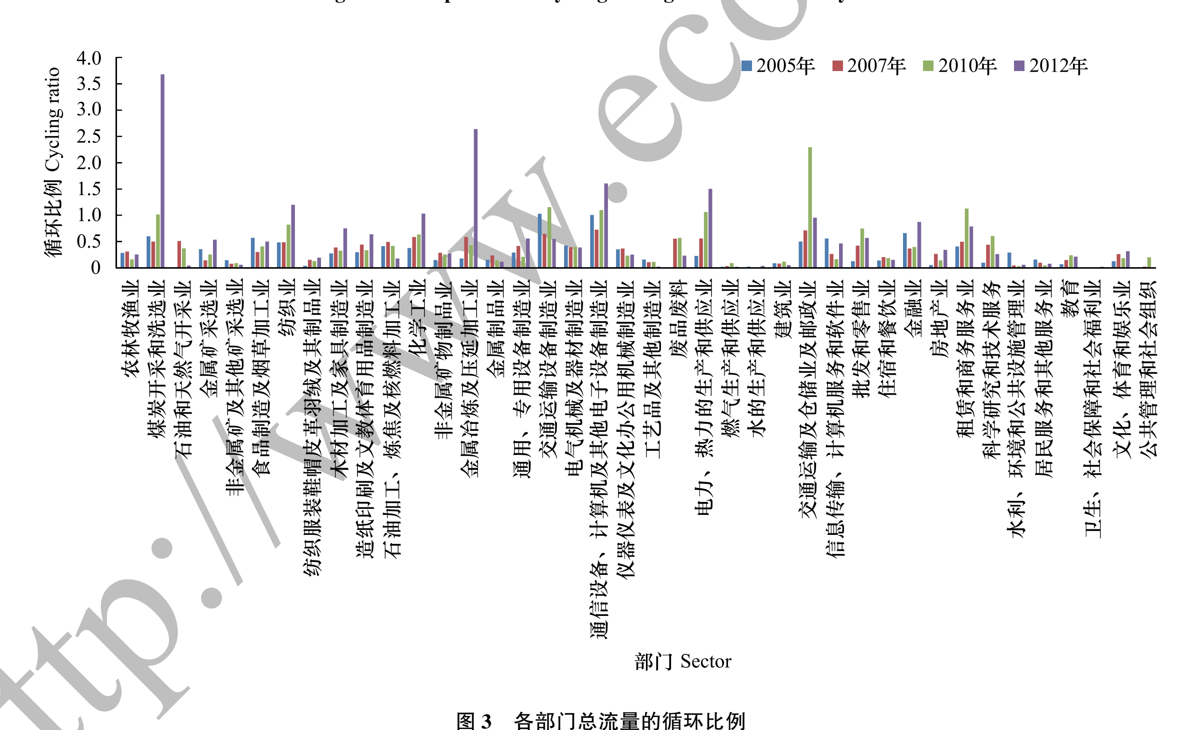


图 3　各部门总流量的循环比例

Fig.3　Cycling ratio in different sectors

环流量呈下降趋势,比较明显的是通信设备计算机及其它电子设备制造业、非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业、石油加工炼焦及核燃料加工业,分别下降 54.6%、76.5%、41.5%、61.9%。

从循环比例可以看出(图 3),24 个工业部门中 1/2 以上的循环比例都随年份有增加趋势,包括煤炭开采和洗选业、纺织业、纺织服装鞋帽皮革羽毛制造业、木材加工及家具制造业、造纸印刷及文教体育制品业、化学工业、非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业、通用专用设备制造业、通信设备、计算机及其他电子制造业、电力热力的生产和供应业、燃气生产和供应业、水的生产和供应业。其中,金属冶炼及压延加工业、电力热

力的生产和供应业、煤炭开采和洗选业 2012 年的循环比例比 2005 年分别增加了 13.9 倍、5.7 倍和 5.2 倍。

2.3.2 生态效率演进规律

生态效率计算的投入指标需要把能源消耗和污染排放这两个重要的环境要素考虑在内，因此本文选取的投入指标为能源消耗量、废水排放量、二氧化硫排放量、烟尘排放量和固体废弃物排放量，产出指标为地区生产总值（GDP）。根据决策单元选取原则（过少的决策单元影响生态效率的准确性），本文选取 2005—2014 年 10a 作为 10 个决策单元。

利用软件 EMS 1.3 进行运算，得到不同年份生态效率值（图 4）。2005—2013 年北京市产业生态网络的生态效率得分均小于 1，说明北京市产业生态系统的投入和产出没有达到最优效率；而 2014 年北京市产业生态网络生态效率得分是 1.186，大于 1，说明 2014 年北京市产业生态系统的投入和产出达到最优效率。

由图 4，北京市产业生态网络生态效率值从 2005 年的 48.75%上升到 2014 年的 118.64%，提高了 2.4 倍，具有明显上升的趋势，表明单位产出所消耗的能源和排放的废物越来越小。根据北京市产业生态网络生态效率随时间增长的增速可将其增长分 4 个阶段：2005—2007 年增速平缓，年平均增长率为 6.03%。能源消耗和废水排放依旧随年份呈增长的趋势，废水排放年平均增长率甚至达到 21%，但是二氧化硫、烟尘和工业固废排放下降，年下降率分别为 10.2%、7.9%、13%，并且 GDP 在这两年内增长 41%，因此生态效率呈现缓慢增长趋势；2007—2009 年增速较快，年平均增长率为 17.42%。这两年内只有能源消耗增长 4.5%，其他废物排放均呈下降趋势，二氧化硫排放在这两年内下降 21%，烟尘排放下降 8.4%，废水排放下降 1.6%，GDP 增加 23.4%，因此单位产出对环境产生的不良影响降速明显，；2009—2011 年增速平缓，年平均增长率为 3.58%，增长缓慢的因素主要是烟尘排放这两年内增加 32.6%；2011—2014 年增速较快，生态效率年平均增长率达到 16.76%。这 4 年处于“北京市第十二个五年规划纲要”期间，这期间北京市提出万元地区生产总值能耗降低 16%，二氧化硫排放总量减少 8%[31]；实际上从 2011 年到 2014 年，万元地区生产总值能耗降低了 25%，二氧化硫排放减少了 19.3%，除废水排放增长 3%以外，其他废物排放均减少，烟尘排放减少 12.8%，工业固废排放减少 100%，GDP 增长 24%。

2.3.3 升性特征及演进规律

2005 年、2007 年、2010 年和 2012 年这 4 个年份上升性、恢复力指数以及 A/C 值如图 5、图 6、图 7 所示。上升性指数从 2005 年到 2012 年有上升趋势，上升性表征系统有效率的方面，所以说明北京市产业生态系统从 2005 年到 2012 年朝着更加有效率的方向发展，其中 2007 年上升性显著高于其他年份，这与上文所描述的产业生态系统循环指数特征的变化规律一致。按部门对上升性指数进行分解，发现 2007 年北京市 2/3 的部门的上升性指数均大于其他年份，尤其是建筑业、通信设备、计算机及其他电子制造业、电力热力的生产供应

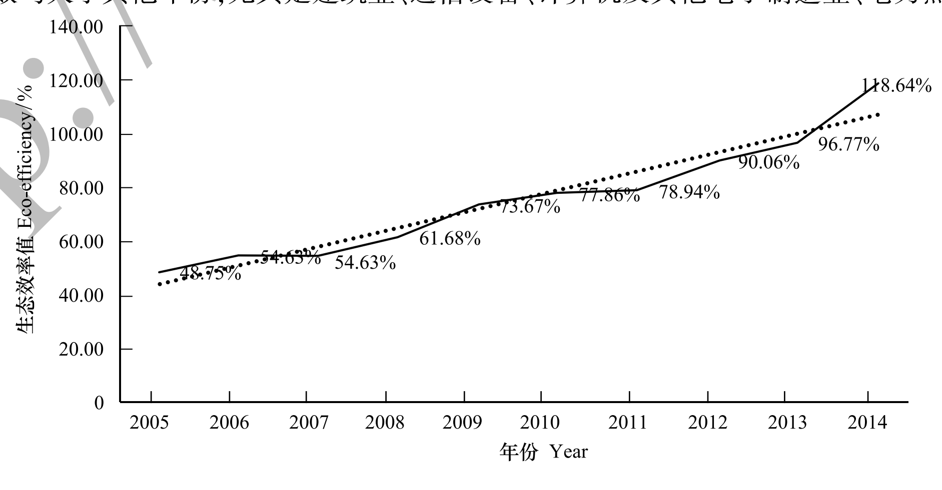


图 4 2005—2012 年北京市产业生态系统生态效率值

Fig.4 Ecological efficiency value and original data of Beijing in year 2005—2014

业、非金属矿物制品业、金属冶炼及压延加工业、化学工业上升性显著高于其他年份。另外,观察到恢复力指数在 2007 年到 2012 年有下降趋势,说明北京市产业生态网络随年份并没有向无效率的方向发展。

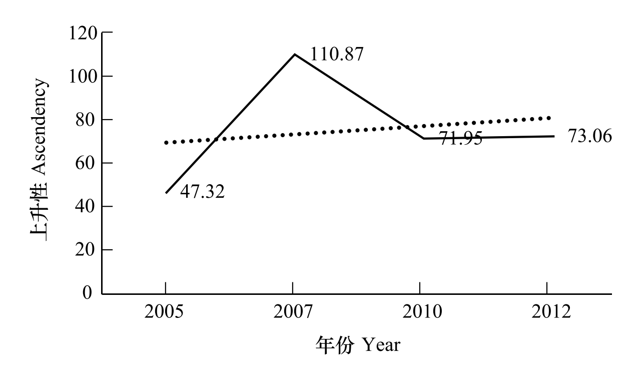


图 5　2005—2012 年北京市产业生态系统上升性趋势图

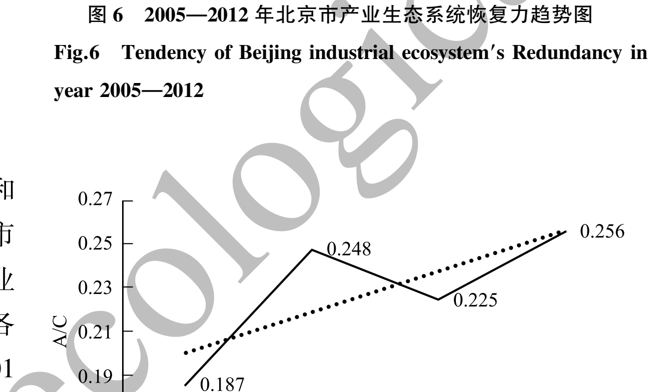
Fig.5　Tendency of Beijing industrial ecosystem's Ascendency in year 2005—2012

恢复力 Redundancy: 350, 300, 250, 200, 150, 100; 336.9; 247.8; 205.85; 212.75; 2005, 2007, 2010, 2012; 年份 Year

图 6　2005—2012 年北京市产业生态系统恢复力趋势图

Fig.6　Tendency of Beijing industrial ecosystem's Redundancy in year 2005—2012

北京市产业生态系统 2005 年、2007 年、2010 年和 2012 年的 A/C 值均小于 0.401,说明这四个年份北京市产业生态网络的上升性相对于恢复力偏小,北京市产业生态网络的有效发展的远低于理想发展水平。但是各年份的 A/C 值随年份变化有增大并且逐年接近 0.401 的趋势,2012 年北京市产业生态网络 A/C 值达到 0.256,比 2005 年增加 27%,说明北京市产业生态网络的上升性和恢复力之间越来越接近平衡状态,系统正向更加稳定和可持续的发向发展。



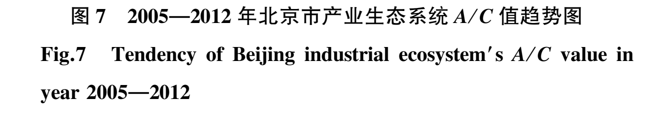


图 7　2005—2012 年北京市产业生态系统 A/C 值趋势图

Fig.7　Tendency of Beijing industrial ecosystem's A/C value in year 2005—2012

3　结论与讨论

3.1　结论

本文基于投入产出模型及借鉴循环性、生态效率及上升性指标阐述了了产业生态网络特征及演进分析方法,通过北京市的实证研究得到如下结论:

(1)从 2005 年到 2012 年,北京市产业生态网络随年份物质的循环性有增加的趋势。24 个工业部门中 1/2 以上部门循环比例随年份有增加趋势,尤其是金属冶炼及压延加工业、电力热力的生产和供应业、煤炭开采和洗选业,它们 2012 年的循环比例比 2005 年分别增加了 13.9 倍、5.7 倍、5.2 倍。

(2)从 2005 年到 2014 年北京市产业生态系统的生态效率呈现波动增速上升趋势,表明北京市单位经济产出所造成的不良环境影响越来越小。根据年平均增速可以将其分为 4 个阶段,2005—2007 年、2009—2011 年为平缓增速期,年平均增速分别为 6.03%、3.58%,2007—2009 年、2011—2014 年为快速增速期,年平均增速分别为 17.42%、16.76%。

(3)北京市产业生态系统的上升性从 2005 年到 2012 年呈现逐步上升趋势,表明整个系统正朝着可持续的方向发展,但从数值来看离理想值还差 36%。

3.2　讨论

(1)图 1 是基于 42 部门构建的产业生态网络结构图,下一步工作将在此基础上进行分室研究,进一步阐明系统结构及组分生态关系。

(2)文中北京市产业生态网络 2007 年的循环指数以及 A/C 值均显著大于其他年份,由于数据支撑的原

因只作了初步分析,还有待进一步探究。

(3)构建城市尺度上的产业共生网络平台,有利于相关产业部门之间的废物或者副产品的交换,使物质得到充分的循环利用,可促进产业生态系统的可持续发展。这也是本研究后续深入研究的一个方向。

参考文献(References):

[1] Graedel T E, Allenby B R. Industrial Ecology. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1995.
[2] 王如松. 循环经济建设的产业生态学方法. 产业与环境, 2003, (Supplement): 48-52.
[3] Frosch R A, Gallopoulos N E. Strategies for manufacturing. Scientific American, 1989, 261(3): 144-152.
[4] Ayres R. Industrial metabolism // Ausubel J H, Sladovich H E, eds. Technology and Environment. Washington, DC: National Academy Press, 1989: 23-25.
[5] Chopra S S, Khanna V. Understanding resilience in industrial symbiosis networks: insights from network analysis. Journal of Environmental Management, 2014, 141: 86-94.
[6] Chen S Q, Chen B. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: a case study of Vienna, Austria. Environmental Science & Technology, 2012, 46(8): 4498-4506.
[7] Van Berkel R, Fujita T, Hashimoto S, Geng Y. Industrial and urban symbiosis in Japan: analysis of the eco-town program 1997-2006. Journal of Environmental Management, 2009, 90(3): 1544-1556.
[8] Zhu Q H, Lowe E A, Wei Y A, Barnes D. Industrial symbiosis in China: a case study of the Guitang Group. Journal of Industrial Ecology, 2007, 11(1): 31-42.
[9] 蔡小军, 李双杰, 刘启浩. 生态工业园共生产业链的形成机理及其稳定性研究. 软科学, 2006, 20(3): 12-14.
[10] 张萌. 工业共生网络形成机理及稳定性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
[11] 孙明贵, 刘建新, 陈雪阳. 上海循环经济发展的因素分析及其途径探讨. 华东经济管理, 2005, 19(3): 76-78.
[12] 蔡建和, 徐鑫华, 曹锡忠, 周静珠. 建立工业园区纺织生态产业链可行性研究. 检验检疫科学, 2003, 13(6): 7-10.
[13] Huang J L, Ulanowicz R E. Ecological network analysis for economic systems: growth and development and implications for sustainable development. PLoS One, 2014, 9(6): e100923.
[14] Bodini A, Bondavalli C, Allesina S. Cities as ecosystems: growth, development and implications for sustainability. Ecological Modelling, 2012, 245: 185-198.
[15] Zhang Y, Zheng H M, Fath B D, Liu H, Yang Z F, Liu G Y, Su M R. Ecological network analysis of an urban metabolic system based on input-output tables: model development and case study for Beijing. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 642-653.
[16] 王如松, 周涛, 陈亮, 刘晶茹, 王震. 产业生态学基础. 北京: 新华出版社, 2006.
[17] Korhonen J. Four ecosystem principles for an industrial ecosystem. Journal of Cleaner Production, 2001, 9(3): 253-259.
[18] 李中才, 徐俊艳, 吴昌友, 张漪. 生态网络分析方法研究综述. 生态学报, 2011, 31(18): 5396-5405.
[19] Ulanowicz R E, Goerner S J. Lietaer B, Gomez R. Quantifying sustainability: resilience, efficiency and the return of information theory. Ecological Complexity, 2009, 6(1): 27-36.
[20] Finn J T. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. Journal of Theoretical Biology, 1976, 56(2): 363-380.
[21] Jollands N, Lermit J, Patterson M. Aggregate eco-efficiency indices for New Zealand-a principal components analysis. Journal of Environmental Management, 2004, 73(4): 293-305.
[22] Organisation for Economic Co-operation and Development. Eco-Efficiency. Paris: OECD, 1998.
[23] Keeler E, Spence M, Zeckhauser R. The optimal control of pollution. Journal of Economic Theory, 1971, 4: 19-34.
[24] Cooper W W, Seilford L M, Tone K. Data Envelopment Analysis: A Comprehensive Text with Models Applications, References and DEA-Solver Software. 2nd ed. New York: Springer, 2007: 309-321.
[25] Chen Y. Ranking efficient units in DEA. Omega, 2004, 32(3): 213-219.
[26] 罗艳. 基于 DEA 方法的指标选取和环境效率评价研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
[27] Ulanowicz R E. Growth and Development: Ecosystems Phenomenology. New York: Spriger-Verlag, 1986: 203.
[28] Ulanowicz R E, Holt R D, Barfield M, Gross K. Limits on ecosystem trophic complexity: insights from ecological network analysis. Ecology Letters, 2014, 17(2): 127-136.
[29] 北京统计信息网. http://www.bjstats.gov.cn/.2005-2012.
[30] 北京市统计年鉴. http://www.bjstats.gov.cn/tjsj/. 2005-2014.
[31] 北京市国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要. http://zhengwu.beijing.gov.cn/ghxx/sewgh/t1176552.htm. 2011